

风洞模拟大气边界层的数据处理

李会知,关 罡,郑 冰

(郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要 :从平均风速剖面和湍流结构两个方面介绍了风洞模拟大气边界层试验中的数据处理方法,给出了通过曲线拟合法求平均风速剖面对数律中的摩擦速度 u_* 、动力粗糙高度 z_0 和指数律中的指数 α 的公式,讨论了湍流积分尺度和边界层模拟比的计算,以及如何通过 $v \sim \ln z$ 曲线的趋势和指数 α 的离散程度判断平均风速剖面模拟合理性.分析结果指出,由于实际湍流特性数据的不充分,模拟流场的湍流特性参数会偏离某些文献数据不能说不合理的.

关键词 :大气边界层模拟 ; 风洞 ; 数据处理

中图分类号 :TU 312.1 文献标识码 :A

近几十年来,风洞模拟试验一直是研究风对建筑物的作用以及建筑物周围的风环境等风工程问题的基本手段,风工程风洞试验研究往往要求先在风洞试验段模拟大气边界层,1974 年欧洲专门召开了大气边界层风洞模拟学术会议^[1].在最初的大气边界层风洞模拟试验^[2~5]中,主要注重于模拟平均风速剖面,近年来,随着问题研究的深入和全面,特别是在高层建筑风振试验等的动态问题的试验研究中,大气湍流结构特性的模拟成为不容忽视的问题.

数据处理是风洞模拟大气边界层的重要环节,通过数据处理,不仅能提供模拟边界层流场的参数,而且能够分析模拟试验的合理性.不仅大气边界层风洞模拟技术有需要探索的问题,就是模拟试验中的数据处理问题也不能说搞得很清楚.本文介绍了风洞模拟大气边界层试验中的数据处理方法,对其中的一些问题进行了探讨,给出了风速剖面对数律中的摩擦速度 u_* 、粗糙高度 z_0 和指数律中的指数 α 的求法以及计算湍流积分尺度和边界层模拟比的公式,作为模拟试验,参考列出了几种常用的湍流强度剖面 and 湍流谱.

1 平均风速剖面

自然界大气边界层实测给出的大气边界层是什么样子,风洞模拟大气边界层要解决的风洞边

界层象不象实际大气边界层或者说是不是实际大气边界层的按比例缩小,风洞模拟大气边界层数据处理要解决的模拟边界层的流场参数是什么,如何通过数据处理分析模拟试验的合理性等等,是摆在研究者面前亟待解决的问题.实际大气边界层由于地球表面上各种粗糙元(草、庄稼、树木、房屋建筑等等)的摩擦阻力作用而形成上大下小的平均风速剖面 and 上小下大的湍流强度剖面,再加上大气边界层流场的复杂性和实测数据的有限性,这个上大下小的平均风速剖面 and 上小下大的湍流强度剖面仍不能准确地描述.目前大气边界层的平均风速剖面有两种表示形式:对数律和指数律.实测表明^[6]在某一高度之上风速剖面比较符合指数律,在此高度之下更符合对数律,这个高度大约在 100 m 左右.模拟边界层试验数据处理的任务之一是给出两种形式的参数求法.

1.1 对数律

根据边界层理论推导,大气边界层风速剖面的对数律分布式如下:

$$\frac{v}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0}, \tag{1}$$

式中: v 是高度 z 处的平均风速; u_* 是摩擦速度; z_0 是动力粗糙高度; $k = 0.4$.在风洞模拟大气边界层的试验中,直接测量对数律中的参数 u_* 、 z_0 难度大,通过数值拟合则简便得多.假如有 n 个

采样点,即 n 对 (z_i, v_i) , 其中 $i = 1, 2, \dots, n$. 利用最小二乘法对 v 与 $\ln z$ 进行线性拟合,得

$$u_* = \frac{0.4 \left(\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n \ln z_i - n \sum_{i=1}^n v_i \ln z_i \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \ln z_i \right)^2 - n \sum_{i=1}^n (\ln z_i)^2}; \quad (2)$$

$$\ln z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n (\ln z_i)^2 - \sum_{i=1}^n \ln z_i \sum_{i=1}^n v_i \ln z_i}{\sum_{i=1}^n v_i \sum_{i=1}^n \ln z_i - n \sum_{i=1}^n v_i \ln z_i}. \quad (3)$$

在实际应用中,由于零平面位移 d 的存在,式(1)变成下式

$$\frac{v}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{z-d}{z_0}. \quad (4)$$

只有先求出 d , 再进行上述拟合才合理. 以 $z_i - d$ 代替式(2)(3)中的 z_i 求 u_* , z_0 而 d 的求得只能通过试凑. 如果 $v \sim \ln z$ 曲线象图1中曲线1, 应该首先核实高度 z 的测量是否准确, 很可能测量出的高度 z 值比实际偏小, 如果风速 v 和高度 z 的测量准确, 这时可以肯定风速分布不符合对数律, 不存在试凑 d 的问题. 试凑是建立在至少底部风速分布符合对数律的基础之上的. 如果底部 $v \sim \ln z$ 是一直线, 则 $d = 0$; 如果底部 $v \sim \ln z$ 象图1中曲线2, 选择一数值 d_1 (d_1 的选取值一般应小于后部粗糙元高度), 绘出 $v \sim \ln(z - d_1)$ 曲线, 如是一直线, $d = d_1$; 如象图1中曲线1, $d < d_1$; 如象图1中曲线2, $d > d_1$, 以此为判据, 即可逼近试凑出 d . 一般来说, 如果10倍于粗糙元高度以上的 $v \sim \ln z$ 图线不是一直线的话, 说明高处不符合对数律, 只能通过改善模拟装置模拟对数律.

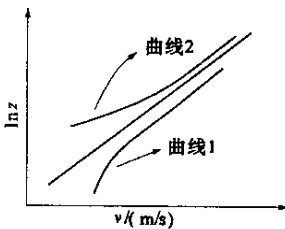


图1 风速高度变化示意图

Fig.1 Sketch of wind velocity with height

1.2 指数律

风速剖面指数律分布的表达式为

$$\frac{v}{v_r} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha. \quad (5)$$

式中: v_r, z_r 是参考点的风速和高度. 试验时, 对 $\ln v \sim \ln z$ 进行线性拟合, 由最小二乘法得

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n (\ln v_i - \ln v_r) (\ln z_i - \ln z_r)}{\sum_{i=1}^n (\ln z_i - \ln z_r)^2}. \quad (6)$$

万方数据

如果试验点 (z_i, v_i) 都在一条指数曲线上, 则选择任一点作为参考点 (v_r, z_r) 计算都得到相同的 α 值, 但如果试验数据不严格地在一条指数曲线上, 选择不同的试验点作为参考点, 将得到不同的 α 值, 这样就给模拟结果 α 带来了不确定性, 反过来又恰好可以以此为判据. 如果利用不同的参考点求得的指数 α 离散程度较大, 则模拟的速度剖面指数律不理想, 应该改进模拟装置. 一般来说, 参考点应选在比较关心的高度范围内, 这样即使试验点不在一条指数曲线上, 但在关心的高度范围内的风速描述准确度要高些.

2 湍流特性

湍流特性是指风速随时间变化的特征, 包括湍流强度、风谱、湍流积分尺度等几个方面.

2.1 湍流强度剖面

按照国际工程数据集 ESDU 75001, 大气边界层风速剖面确定, 则 z_0 确定, 纵向湍流强度剖面 I_u 也相应确定.

$$I_u = \frac{1}{\ln(z/z_0)} [0.867 + 0.566 \lg z - 0.24 (\lg z)^2] \lambda, \quad (7)$$

式中: 当 $z_0 \leq 0.02$ m 时, $\lambda = 1.0$; 当 $z_0 > 0.02$ m 时, $\lambda = 0.76/z_0^{0.07}$.

上海建筑科学研究所田浦根据上海和广州的实测提出:

$$I_u = 1.5 \alpha \left(\frac{z}{10} \right)^{-1.7\alpha}. \quad (8)$$

式(7)通过 z_0 使湍流强度剖面 I_u 与风速剖面建立了唯一对应关系, 式(8)通过指数 α 使湍流强度剖面与风速剖面建立了唯一的对应关系. 本文认为, 式(7)(8)均不能作为湍流强度剖面的准确表达式, 均有其局限性和适用范围, 理由是: ①自然界是复杂的, 湍流强度剖面与风速剖面的对应关系不应是唯一的, 这点可通过风洞试验证明. 在风洞模拟大气边界层试验中, 通过调整模拟装置, 能在模拟相同的风速剖面前提下得到不同的湍流强度剖面; ②上述两式之间不一致.

但上述(7)(8)两式是根据实测数据提出的, 风洞模拟大气边界层试验得到的湍流强度剖面与上述两式不一致不能说不合理, 但不应相差太远.

2.2 风谱和湍流积分尺度

风谱表示湍流脉动能量的频率分布, 是分析风致结构响应的重要参数. 众多学者通过实测给出了能量的定性分布, 如卓越周期(频率)在 35 s

(0.028 Hz)左右,频率 0.25 Hz 以上的脉动能量很小,但不同学者给出的定量分布表达式却有很大差别,这恰说明了各自的局限性,也说明实测还有很多工作要做.表 1 是几种常见的风谱表达式.

表 1 几种典型的风谱表达式

Table 1 Typical wind spectrum expression

提出者	$\frac{nS_z}{\sigma_u^2}$	x 计算式
Von Karman(1946)	$\frac{4x}{(1+70.8x^2)^{5/6}}$	$x = \frac{nL_u}{V_z}$
Davenport(1961)	$\frac{4x^2}{(1+x^2)^{4/3}}$	$x = \frac{1200n}{V_{10}}$
Harris(1968)	$\frac{4x}{(2+x^2)^{5/6}}$	$x = \frac{1800n}{V_{10}}$
刘郁馨(1986)	$\frac{326x^{1.15}}{(1+71x^{1.15})^{5/3}}$	$x = \frac{nz}{v_z}$
田浦(1988)	$\left(\frac{z}{10}\right)^{-0.5\alpha} \frac{4.8x}{(2+x^2)^{5/8}}$	$x = \frac{300n}{V_{10}} z^\alpha$

目前,许多国家采用的是冯·卡门(Von Karman)谱,可以以此谱为根据导出湍流积分尺度.从

表 1 中冯·卡门谱知,当 $\frac{nL_u}{v_z} = 1$ 时, $\frac{nS_z}{\sigma_u^2} = 0.114$, 由模拟谱的纵坐标的 0.114 值定出对应频率 n , 即得到湍流积分尺度 $L_u = v_z/n$, 这种求湍流积分尺度的方法称为谱拟合法.由于这样求得的 L_u 是建立在测量所得的谱的基础之上的,如果谱不符合冯·卡门谱的形式,则这种处理方法求湍流积分尺度缺少合理性,会带来很大误差.本文认为,结构共振响应频率附近区域的脉动能量影响比较大,所以可以以此区域的风谱模拟为基准,要求在这个区域的风谱与冯·卡门谱相符,并近似求出湍流积分尺度.

另外还可以通过求相关函数求湍流积分尺度,空间两点 x, x' 的纵向相关函数为

$$\rho(x, x') = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x, t)u(x', t)dt}{\sigma_u(x)\sigma_u(x')} ; (9)$$

$$\sigma_u^2(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u^2(x, t)dt, \quad (10)$$

$u(x, t)$ 为纵向脉动风速,则湍流积分尺度

$$L_u = \int_0^\infty \rho(x, x')\chi(x - x'). \quad (11)$$

这种求空间相关的方法,在风洞中需要多点同时测量,要求高,难度大.利用求自相关函数的方法则简便得多,这种方法是建立在 Tailor 提出的 frozen turbulence 假说之上的.公式如下:

万方数据

$$\rho_u(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T u(x, t)u(x, t + \tau)dt}{\sigma_u^2(x)} ; \quad (12)$$

$$T_u = \int_0^\infty \rho_u(\tau)\chi\tau ; \quad (13)$$

$$L_u = T_uv_z. \quad (14)$$

2.3 大气边界层模拟比例

建立风洞大气边界层流场主要是为了在其中进行结构模型试验,如果是为了测量结构表面平均风压分布,只要平均风速剖面相似即可^[7](α 相等即可),但对于在模拟边界层流场中进行的结构动态风响应试验,则要求模型几何比例与边界层缩尺比一致,一种确定边界层流场模拟比例的简单方法是由大气边界层与模拟边界层 z_0 (可由式(3)确定)之比确定;另一种确定大气边界层模拟比的方法是通过湍流积分尺度确定.

国际工程数据集 ESDU 75001 给出纵向湍流积分尺度表达式为

$$L_u = 25 \frac{z^{0.35}}{z_0^{0.063}}, \quad (15)$$

假设模拟比为 B , 则 $L_{uf} = BL_{um}$, $z_f = Bz_m$, $z_{0f} = Bz_{0m}$.其中,下标 f 表示是实际边界层参数,下标 m 表示是模拟边界层参数,代入式(15)得

$$B = \frac{141.5z_m^{0.538}}{L_{um}^{1.538}z_{0f}^{0.097}}, \quad (16)$$

根据模拟风速剖面幂指数 α ,查 ESDU76001 表 1 得出对应的 z_{0f} , z_m 和 L_{um} 由试验结果给出.由此可确定大气边界层模拟比值.

文献[6]提供的大气边界层湍流积分尺度计算经验公式为

$$L_u = Cz^m, \quad (17)$$

式中: C 和 m 的值可由文献[6]查出; z 为高度.由式(17)计算的 L_u 与模拟边界层 L_u 之比为大气边界层模拟比.

可以看出,计算大气边界层模拟比有多种方法,其结果不尽一致,这主要还是由于对实际大气边界层的认识不够清晰,各经验公式不一致或者说各有其应用范围和局限性.

3 结束语

风洞模拟大气边界层是一个被动的试凑过程,一个逐渐逼近的过程,理想的风洞大气边界层模拟要求平均风速剖面、湍流强度剖面、风谱和湍流积分尺度等各个方面都与自然界大气边界层相

似.但是,这里存在两方面的问题,一是自然界大气边界层的实测数据还不充分,大气边界层的特征数据尚不能确切描述,特别是湍流特性数据极其有限.二是风洞模拟试验中平均风速剖面、湍流强度剖面、风谱和湍流积分尺度的相关性难以把握.因此,大气边界层模拟试验的做法往往是把握平均风速剖面的相似、湍流强度剖面的近似,风谱在前两者满足时不再调整,直接测量给出,并与表 1 给出的经验风谱比较,评估其相似性或者说偏差程度.本文局限于讨论模拟试验的数据处理方法,给出了通过曲线拟合方法求平均风速剖面对数律中的摩擦速度 u_* 、动力粗糙高度 z_0 和指数律中的指数 α 的公式,并指出了通过 $v \sim \ln z$ 曲线的趋势和指数 α 的离散程度判断平均风速剖面模拟合理性的技巧,讨论了湍流积分尺度和边界层模拟比的计算问题,由于实际湍流特性数据的不充分,模拟流场的湍流特性参数偏离某些文献的数据不能说的不合理的,这个问题的解决以及湍流特性参数计算方法的可靠程度需结合进一步的实测和风洞模拟试验来讨论.

参考文献：

[1] HUNT J C R , FERNHOLZ H. Wind tunnel simulation of the atmospheric boundary layer : a report of Euromech[J]. Fluid Mechanics , 1975 (3) 543 – 559.

[2] CUNIHAN J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunne[J]. Atmospheric environment , 1969 (3) : 197 – 214.

[3] CUNIHAN J. Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel[J]. Atmospheric environment , 1973 (7) : 673 – 689.

[4] COOK N J. Simulation technique for short test – section wind tunnels : roughness , barrier and mixing – device method[A]. REINHOLD T A. Wind tunnel modeling for civil engineering application[C]. Cambridge : Cambridge University Press , 1982. 126 – 136.

[5] 刘尚培 ,符致福. 大气边界层的风洞模拟技术[J]. 气动力学杂志 ,1984 (3) 8 – 15.

[6] 埃米尔·希缪 ,罗伯特·斯坎伦. 风对结构的作用——风工程导论[M]. 刘尚培 ,项海帆 ,谢霖明 ,译. 上海 :同济大学出版社 ,1992.

[7] 王兆印. 大气边界层的风洞模拟[J]. 实验力学 , 1998 (3) 283 – 293.

Data Processing of Atmospheric Boundary Layer Simulation Test

LI Hui – zhi , GUAN Gang , ZHENG Bing

(College of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract : The paper introduces data analysis and processing of atmospheric boundary layer simulation test. Evaluation of friction velocity u_* and roughness length z_0 in the logarithmic wind profile and power α in the power velocity profile by way of curve – fit is given. Calculation of turbulence integral scale and wind tunnel boundary layer scale is discussed. The technique for analyzing rational of simulation test by means of trend of $v \sim \ln z$ curve and dispersed degree of power α is introduced. The disagreement of turbulence parameters with some references is not unreasonable ,since real atmospheric boundary layer is not fully understood.

Key words : atmospheric boundary layer simulation ; wind tunnel ; data processing